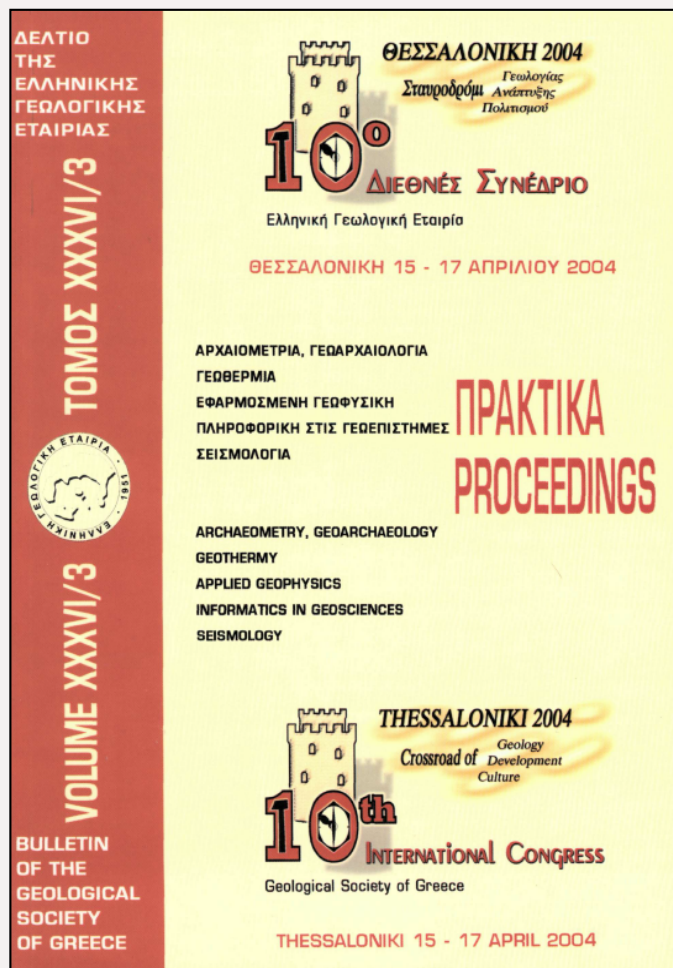


## Bulletin of the Geological Society of Greece

Vol. 36, 2004



### RAYLEIGH SURFACE WAVE ANALYSIS AND APPLICATION AT THE MONFALCONE LANDFILL, AND AT THE INDUSTRIAL AREA OF PORTO PETROLI, GENOA, NORTHERN ITALY

Κρητικάκης Σ.

Applied Geophysics Lab,  
Department of Mineral  
Resources Engineering,  
Technical University of Crete

Βαφειδής Α.

Applied Geophysics Lab,  
Department of Mineral  
Resources Engineering,  
Technical University of Crete

Gourry J.

BRGM Development  
Planning and Natural Risks  
Division

<https://doi.org/10.12681/bgsg.16466>

Copyright © 2018 S. G. Kritikakis, A. Vafidis, J. C. Gourry



#### To cite this article:

Κρητικάκης, Σ., Βαφειδής, Α., & Gourry, J. (2004). RAYLEIGH SURFACE WAVE ANALYSIS AND APPLICATION AT THE MONFALCONE LANDFILL, AND AT THE INDUSTRIAL AREA OF PORTO PETROLI, GENOA, NORTHERN ITALY. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 36(3), 1234-1243. doi:<https://doi.org/10.12681/bgsg.16466>

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ RAYLEIGH ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΧΩΡΟ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΣΤΗ Β. ΙΤΑΛΙΑ ΚΑΙ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ PORTO PETROLI, GENOA

Κρητικάκης Σ. Γ.<sup>1</sup>, Βαφείδης Α.<sup>1</sup>, Gourry J. C.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 73100, Πολυτεχνειούπολη, Χανιά, [gkritik@mred.tuc.gr](mailto:gkritik@mred.tuc.gr), [vafidis@mred.tuc.gr](mailto:vafidis@mred.tuc.gr)

<sup>2</sup> BRGM Development Planning and Natural Risks Division, Orléans, France, [jc.gourry@brgm.fr](mailto:jc.gourry@brgm.fr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το φαινόμενο της διασποράς των επιφανειακών κυμάτων και ειδικότερα των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, έχει αποτελέσει τα τελευταία χρόνια εφαλτήριο για την εφαρμογή σύγχρονων τεχνικών της γεωτεχνικής και περιβαλλοντικής γεωφυσικής. Στις μέρες μας, η ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh χρησιμοποιείται ευρύτατα για τον προσδιορισμό των ταχυτήτων των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων.

Στην εργασία αυτή περιγράφεται κυρίως η μεθοδολογία ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται εφαρμογές της σε σεισμικά δεδομένα που προέρχονται από διασκοπήσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος ΥΓΕΙΑ, σε δύο περιβαλλοντικά επιβαρημένες περιοχές: α) στην περιοχή του Monfalcone στη βόρεια Ιταλία και β) στην βιομηχανική περιοχή Porto Petroli, στη Γένοβα.

Η μεθοδολογία αυτή αποδεικνύεται πολύ χρήσιμη στην οριοθέτηση του ετερογενούς εδάφους που περιέχει θαμμένα απορρίμματα στην περιοχή του Monfalcone και στην χαρτογράφηση του ανάγλυφου του υποβάθρου της βιομηχανικής περιοχής του Porto Petroli, μέσω του προσδιορισμού των ταχυτήτων των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων.

### 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι τα επιφανειακά σεισμικά κύματα παρουσιάζουν έντονο το φαινόμενο της διασποράς (dispersion), δηλαδή της εξάρτησης της ταχύτητας φάσης από τη συχνότητα. Η ταχύτητα φάσης των κυμάτων Rayleigh σε οριζόντια στρωματωμένο εδαφικό μοντέλο εξαρτάται από τη συχνότητα και τέσσερις εδαφικές παραμέτρους (Schwab and Knopoff, 1972):

- Ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων ( $P$  – κύματα)
- Ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων ( $S$  – κύματα)
- Πυκνότητα των σχηματισμών
- Πάχος κάθε στρώματος

Η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων επηρεάζει την καμπύλη διασποράς περισσότερο από όλες τις άλλες εδαφικές παραμέτρους. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιώντας τεχνικές αντιστροφής, είναι δυνατό να προσδιοριστεί η κατανομή της ταχύτητας των  $S$  – κυμάτων συναρτήσει του βάθους, από την καμπύλη διασποράς Rayleigh.

Η πλευρική μεταβολή της ταχύτητας των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τεχνικές roll along κατά την απόκτηση των σεισμικών καταγραφών (Miller et al, 1999). Από κάθε καταγραφή κοινής πηγής και μετά την αντιστροφή της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς προκύπτει η ταχύτητα των  $S$  – κυμάτων συναρτήσει του βάθους. Τοποθετώντας τα αποτελέσματα από κάθε αντιστροφή στο κέντρο του αναπτύγματος πηγής - γεωφώνων προκύπτει η ψευδοτομή της ταχύτητας των  $S$  – κυμάτων.

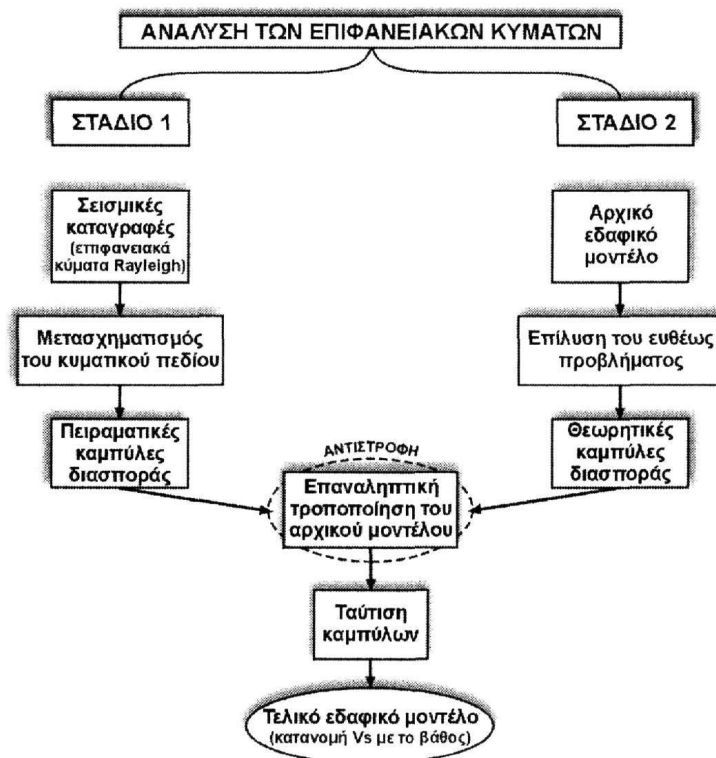
Πολλές εφαρμογές προσδιορισμού της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων από σεισμικά δεδομένα επιφανειακών κυμάτων (Ραπτάκης, 1995, Stokoe et al., 1994, Misiek, 1996) έχουν αποδείξει την αξιοπιστία της μεθόδου αυτής. Τέλος, οι νέες τάσεις στο συγκεκριμένο αντικείμενο εισάγουν την παράμετρο της πλευρικής ανομοιογένειας της ταχύτητας στα εδαφικά μοντέλα (Misiek, 1996) για

τον χαρακτηρισμό των σχηματισμών με άμεσο γεωτεχνικό και περιβαλλοντικό ενδιαφέρον (Miller and Xia, 1999, Miller et al., 1999).

## 2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Η ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων περιλαμβάνει τη λήψη καταγραφών πλούσιων σε επιφανειακά κύματα Rayleigh και την αντιστροφή των χαρακτηριστικών καμπύλων διασποράς τους, για τον καθορισμό της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων κατανεμημένης με το βάθος. Μια από τις κυριότερες διαδικασίες για την ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων είναι ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών καμπύλων διασποράς από τις καταγραφές. Η αντιστροφή των χαρακτηριστικών καμπύλων διασποράς αποτελεί τη δεύτερη σημαντικότερη φάση της επεξεργασίας.

Από τη διαδικασία της αντιστροφής προσδιορίζονται οι παράμετροι του εδαφικού μοντέλου. Η μεθοδολογία της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh είναι δυνατό να χωριστεί σε δύο διακριτά στάδια (Σχ. 1). Κατά το πρώτο στάδιο, από τις σεισμικές καταγραφές κοινής πηγής, οι οποίες θα πρέπει να περιλαμβάνουν σημαντική σεισμική ενέργεια κατανεμημένη στα επιφανειακά κύματα, προκύπτουν οι πειραματικές καμπύλες διασποράς. Ενώ στο δεύτερο στάδιο προσδιορίζονται οι θεωρητικές καμπύλες διασποράς για οριζόντια στρωματωμένο εδαφικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας την τεχνική Thomson-Haskell (Haskell, 1953, Schwab and Knopoff, 1972). Τροποποιώντας επαναληπτικά το εδαφικό μοντέλο επιτυγχάνεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης διασποράς στην πειραματική (διαδικασία που ονομάζεται αντιστροφή). Έτσι, εφόσον πραγματοποιηθεί ταύτιση των καμπύλων, προσδιορίζεται το τελικό εδαφικό μοντέλο (κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων με το βάθος). Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται αναλυτικά όλα τα βήματα που ακολουθούνται κατά τη διαδικασία της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh.



Σχήμα 1. Διάγραμμα ροής που περιγράφει τη μεθοδολογία της ανάλυσης των κυμάτων Rayleigh.



## 2.1 Στάδιο 1

### 2.1.1 Απόκτηση σεισμικών καταγραφών

Στα πειράματα σεισμικής διασκόπησης, τα επιφανειακά κύματα εμφανίζονται στα σειсмоγράμματα μετά τα κύματα χώρου και αναγνωρίζονται από το μεγάλο πλάτος και τη σχετικά χαμηλή συχνότητά τους. Η απόκτηση των σεισμικών καταγραφών, στις οποίες θα πρέπει να δεσπόζουν τα επιφανειακά κύματα, απαιτεί ορισμένες ρυθμίσεις, όπως είναι η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού (γεωφώνω κατάλληλης ιδιοσυχνότητας και σεισμική πηγή με ευρύ φασματικό περιεχόμενο), η ρύθμιση της απόστασης πηγής – γεωφώνου και της ισαπόστασης των γεωφώνων καθώς και η ρύθμιση του διαστήματος δειγματοληψίας και της διάρκειας καταγραφής. Για την συλλογή των σεισμικών δεδομένων χρησιμοποιείται διάταξη πηγής - γεωφώνων και κύλισή της (roll along) με σταθερό βήμα προχώρησης, προκειμένου τα αποτελέσματα της αντιστροφής να ισαπέχουν πάνω στην ψευδοτομή.

Η σεισμική πηγή παίζει σημαντικό ρόλο για τη λήψη των δεδομένων, καθώς όσο πιο πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο παρέχει, τόσο καλύτερη ανάλυση επιτυγχάνεται. Επίσης, για τη διασκόπηση βαθύτερων γεωλογικών σχηματισμών απαιτείται η καταγραφή σημαντικής ενέργειας σε χαμηλές συχνότητες. Εκτενέστερες αναφορές σχετικά με τις βέλτιστες παραμέτρους απόκτησης των σεισμικών καταγραφών έχουν παρουσιαστεί από τους Park et al (1999).

### 2.1.2 Μετασχηματισμός του κυματικού πεδίου

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες διασποράς των επιφανειακών κυμάτων που καταγράφονται από διάταξη κοινής πηγής προκύπτουν μετά την εφαρμογή ενός μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου από τον χώρο  $x - t$  στον χώρο  $p - \omega$  (McMechan and Yedlin, 1981).

Αρχικά εφαρμόζεται γραμμική χρονική απόκλιση (Linear MoveOut – LMO) στα σεισμικά δεδομένα:

$$u(x, t) \xrightarrow{\text{LMO}} U(x, \tau) = U(x, t - px) \quad (1)$$

όπου  $u(x, t)$  είναι η κατακόρυφη μετατόπιση των υλικών σημείων στο πεδίο απόστασης – χρόνου,  $\tau$  είναι ο χρόνος καθυστέρησης:

$$\tau = t - px \quad (2)$$

και  $p$  είναι η παράμετρος της σεισμικής ακτίνας (εξ. 3), η οποία για οριζόντια διαδιδόμενα σεισμικά κύματα ισούται με το αντίστροφο της σεισμικής ταχύτητας και ονομάζεται βραδύτητα φάσης (Yilmaz, 1987).

$$p = \left. \frac{\sin(i)}{V} \right|_{i=90^\circ} \Rightarrow p = \frac{1}{V_{\text{hor}}} \quad (3)$$

Επίσης, η βραδύτητα φάσης (phase slowness) σχετίζεται με την ταχύτητα φάσης ( $c$ ) σύμφωνα με τη σχέση:

$$p = \frac{1}{c} \quad (4)$$

Η ταχύτητα φάσης εκφράζει τη ταχύτητα διάδοσης κάθε αρμονικού σεισμικού κύματος.

Εφαρμόζοντας την ιδιότητα της χρονικής μετάθεσης (time shifting) του μετασχηματισμού Fourier, η γραμμική χρονική απόκλιση πραγματοποιείται στο χώρο των συχνοτήτων σύμφωνα με την σχέση:

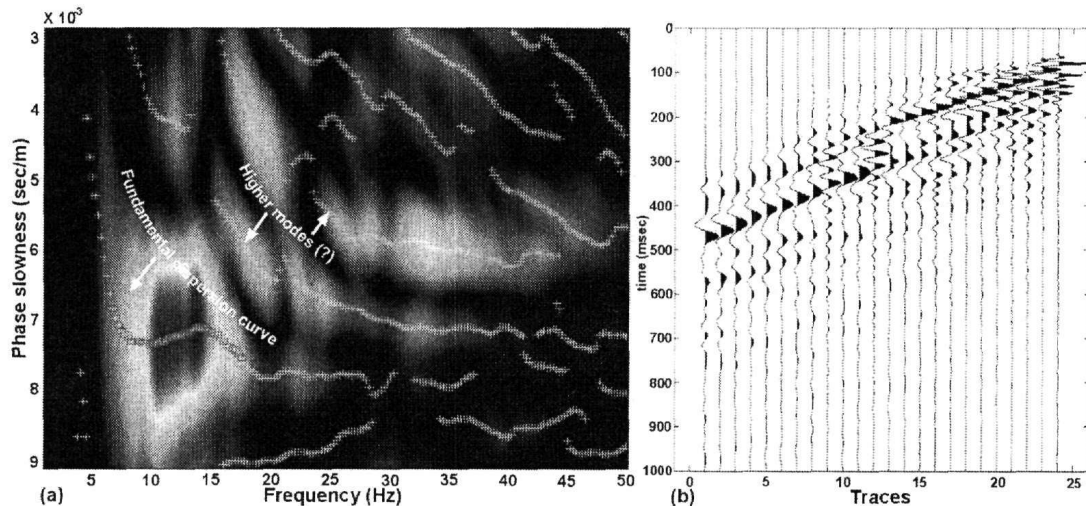
$$U(x, \tau) = U(x, t - px) \leftrightarrow \tilde{U}(x, f) e^{-i2\pi fpx} \quad (5)$$

όπου  $u(x, t) \leftrightarrow \tilde{U}(x, f)$  και το σύμβολο  $\leftrightarrow$  υποδηλώνει ζεύγος Fourier.

Ακολουθώντας, αθροίζονται τα ίχνη που έχουν υποστεί γραμμική χρονική απόκλιση στο χώρο των συχνοτήτων:

$$\tilde{S}(p, f) = \sum_x \tilde{U}(x, f) \cdot e^{-i2\pi f p x} \quad (6)$$

όπου το  $\tilde{S}$  εκφράζει το κυματικό πεδίο στο χώρο  $(p - f)$ .



Σχήμα 2. (a) Καμπύλες διασποράς που προέκυψαν από το μετασχηματισμό του κυματικού πεδίου της καταγραφής με κωδικό πεδίου (FFID) 206 (b) στην περιοχή του Monfalcone. Διακρίνεται η θεμελιώδης καμπύλη διασποράς και πιθανόν 2 καμπύλες ανώτερης τάξης.

Οι καμπύλες διασποράς αντιστοιχούν σε τοπικά ενεργειακά μέγιστα της κυματικής ενέργειας που παρατηρούνται στο πεδίο  $p - f$  και ουσιαστικά απεικονίζουν τη μεταβολή της ταχύτητας φάσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh συναρτήσει της συχνότητας (σταυροί στο σχ. 2a). Το ενδιαφέρον της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων στη συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται στη θεμελιώδη χαρακτηριστική καμπύλη (fundamental dispersion curve), ενώ καμπύλες διασποράς ανώτερης τάξης (higher modes) εμφανίζουν υψηλότερες ταχύτητες από αυτήν της θεμελιώδους για συγκεκριμένη συχνότητα.

## 2.2 Στάδιο 2

### 2.2.1 Προσδιορισμός αρχικού εδαφικού μοντέλου

Στις μεθόδους αντιστροφής η μη γραμμική αναλυτική σχέση προσεγγίζεται με τη χρήση του αναπτύγματος Taylor. Στη συνέχεια εφαρμόζεται επαναληπτική διαδικασία, για την επιτυχή σύγκλιση της οποίας απαιτείται το αρχικό μοντέλο να βρίσκεται «σχετικά» κοντά στη γειτονιά της λύσης. Επομένως, για την ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh είναι πολύ σημαντική η επιλογή κατάλληλου αρχικού εδαφικού μοντέλου.

Έτσι, για τον προσδιορισμό του αρχικού εδαφικού μοντέλου λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

- Από τις καμπύλες διασποράς και για κάθε τιμή ταχύτητας φάσης και συχνότητας είναι δυνατό να προσδιοριστεί το αντίστοιχο μήκος κύματος των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, σύμφωνα με τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής:

$$c_R = \lambda_R \cdot f_R \quad (7)$$

όπου  $c_R$  είναι η ταχύτητα φάσης,  $f_R$  η συχνότητα και  $\lambda_R$  το μήκος κύματος των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh.

- Η κατακόρυφη μετατόπιση των υλικών σημείων κατά τη διάδοση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh σε βάθος ίσο με το μήκος κύματός τους ισούται περίπου με το 15 % της μετατόπισης στην επιφάνεια (Nazarian, 1984). Άρα, τα επιφανειακά κύματα Rayleigh διεισδύουν πρακτικά σε μέγιστο βάθος περίπου ίσο με το μήκος κύματός τους και επομένως



οι πληροφορίες που εμπεριέχουν για τους εδαφικούς σχηματισμούς συνοψίζονται μέχρι το βάθος αυτό.

- Η ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh συνδέεται με την ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων ( $V_s$ ) με τη σχέση:

$$c_R(f_i) = a \cdot V_s(f_i) \quad (8)$$

όπου ο αριθμητικός συντελεστής  $a$  λαμβάνει τιμές από 0.874 έως 0.955 για αντίστοιχες τιμές του λόγου Poisson από 0.0 έως 0.5 (Xia et al, 1999, Stokoe et al, 1994).

Εν κατακλείδι, υπολογίζεται το μήκος κύματος των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh από την εξ. 7. Στη συνέχεια καθορίζεται το μέγιστο βάθος ( $d$ ) διείσδυσης των επιφανειακών κυμάτων και το πάχος των στρωμάτων του εδαφικού μοντέλου, το οποίο αυξάνεται με το βάθος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ικανοποιητική εκτίμηση της κατανομής της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων με το βάθος. Ακολουθώντας, θεωρώντας σταθερό λόγο του Poisson ( $\nu$ ) για κάθε εδαφικό στρώμα είναι δυνατό να εκτιμηθεί η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων ( $V_p$ ). Τέλος, με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων εκτιμάται και η πυκνότητα κάθε εδαφικού στρώματος. Πληροφορίες από άλλες μεθόδους που αφορούν την ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων και την πυκνότητα των γεωλογικών σχηματισμών είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν απευθείας ως παράμετροι του αρχικού εδαφικού μοντέλου.

### 2.2.2 Επίλυση του ευθέως προβλήματος

Η ταχύτητα φάσης των κυμάτων Rayleigh,  $c_{Ri}$ , προσδιορίζεται από την συνάρτηση διασποράς  $F$  στη μη γραμμική και πεπλεγμένη της μορφή (Schwab and Knopoff, 1972):

$$F(f_i, c_{Ri}, V_s, V_p, \rho, d) = 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (9)$$

όπου  $f_i$  είναι η συχνότητα σε Hz,  $c_{Ri}$  είναι η ταχύτητα φάσης των κυμάτων Rayleigh για τη συχνότητα  $f_i$ ,  $\mathbf{V}_s = (Vs_1, Vs_2, \dots, Vs_m)^T$  είναι το διάνυσμα των ταχυτήτων των  $S$  – κυμάτων, με  $V_{sj}$  την ταχύτητα των  $S$  – κυμάτων του  $j$  στρώματος ( $j = 1, 2, \dots, m$ ),  $m$  είναι ο αριθμός των στρωμάτων,  $\mathbf{V}_p = (Vp_1, Vp_2, \dots, Vp_m)^T$  είναι το διάνυσμα των ταχυτήτων των  $P$  – κυμάτων, με  $V_{pj}$  την ταχύτητα των  $P$  – κυμάτων του  $j$  στρώματος,  $\mathbf{\rho} = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m)^T$  είναι το διάνυσμα των πυκνοτήτων, με  $\rho_j$  την πυκνότητα του  $j$  στρώματος και  $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_{m-1})^T$  είναι το διάνυσμα των παχών, με  $d_j$  το πάχος του  $j$  στρώματος. Οι ρίζες της αναλυτικής σχέσης της συνάρτησης διασποράς για συγκεκριμένες παραμέτρους του μοντέλου ( $\mathbf{V}_s$ ,  $\mathbf{V}_p$ ,  $\mathbf{\rho}$ , και  $\mathbf{d}$ ) και για συχνότητα ( $f_i$ ) αντιστοιχούν στις ταχύτητες φάσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh στη συγκεκριμένη συχνότητα. Σε αυτή την εργασία, εξετάζεται μόνο η θεμελιώδης χαρακτηριστική καμπύλη (fundamental mode) η οποία, σε χαμηλές συχνότητες, αποτελείται από τις μικρότερες θετικές ρίζες της συνάρτησης διασποράς για διάφορες συχνότητες  $f_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Για να προσδιοριστεί η ταχύτητα φάσης  $c_{Ri}$  στις διάφορες συχνότητες  $f_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) χρησιμοποιείται η μέθοδος της διχοτόμησης (bisection), η οποία προσδιορίζει τις ρίζες της συνάρτησης διασποράς (εξ. 9, Press et al., 1992).

### 2.3 Αντιστροφή των καμπύλων διασποράς

Εφόσον ο αντικειμενικός στόχος είναι ο μηδενισμός της συνάρτησης διασποράς (εξ. 9), η ταχύτητα φάσης,  $c_{Ri}$ , για μια δεδομένη συχνότητα  $f_i$  είναι δυνατό να εκφραστεί ως συνάρτηση των ταχυτήτων των  $S$ -κυμάτων σύμφωνα με τη σχέση (Κρητικάκης, 2001) :

$$c_{Ri} = c_{Ri}(Vs_1, Vs_2, \dots, Vs_m, \{Vp_{1,2,\dots,m}, \rho_{1,2,\dots,m}, d_{1,2,\dots,m}\}, f_i) \quad (10)$$

Η συνάρτηση αυτή (εξ. 10) είναι δυνατό να αναπτυχθεί σε σειρά Taylor ως προς  $V_s$  διατηρώντας μόνο πρώτης τάξης όρους.

Έτσι, προκύπτει η σχέση:

$$c_{Ri} - c_{Ri}^0 = \sum_{j=1}^m \frac{\partial c_{Ri}}{\partial V_{Sj}} \bigg|_{\substack{V_{S1}=V_{S1}^0 \\ V_{S2}=V_{S2}^0 \\ \dots \\ V_{Sm}=V_{Sm}^0}} \cdot (V_{Sj} - V_{Sj}^0) \quad (11)$$

όπου το  $i = 1, 2, \dots, n$  είναι ο ο αριθμός των μετρήσεων, ενώ ο εκθέτης  $^0$  συμβολίζει το αρχικό μοντέλο τόσο για τις  $V_{Sj}^0$  όσο και για τις υπολογισμένες τιμές της ταχύτητας φάσης  $C_{Ri}$ . Στη διανυσματική μορφή η ίδια σχέση γράφεται ως εξής:

$$\Delta c_R = J_{ij} \cdot \Delta V_S \quad (12)$$

όπου το διάνυσμα:

$$\Delta c_R = c_R - c_R^0 \quad (13)$$

εκφράζει τη διαφορά ανάμεσα στα διανύσματα της πειραματικής και θεωρητικής ταχύτητας φάσης. Το διάνυσμα:

$$\Delta V_S = V_S - V_S^0 \quad (14)$$

περιέχει τις άγνωστες ταχύτητες  $V_S$  αλλά και τις αντίστοιχες  $V_S^0$  του αρχικού εδαφικού μοντέλου. Τέλος, η Ιακωβιανή  $J_{ij}$  της συνάρτησης διασποράς, προσδιορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$J_{ij} = - \frac{\frac{\partial F}{\partial V_{Sj}}}{\frac{\partial F}{\partial c_{Ri}}} = - \frac{\partial c_{Ri}}{\partial V_{Sj}} \quad (15)$$

όπου το  $j = 1, 2, \dots, m$ , συμβολίζει το πλήθος των εδαφικών στρωμάτων (συμπεριλαμβανομένου και του ημιχώρου). Ο προσδιορισμός των μερικών παραγώγων της Ιακωβιανής (εξ. 15) κατά τη διαδικασία της αντιστροφής, επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της πολυωνυμικής παρεμβολής (polynomial extrapolation) του Ridder (Press et al., 1992).

Για το σύστημα των γραμμικών εξισώσεων (εξ. 12), ορίζεται αντικειμενική συνάρτηση, έτσι ώστε η λύση του να προκύπτει μέσω της ελαχιστοποίησής της:

$$\bar{\epsilon} = J \cdot \bar{V}_S - \Delta \bar{c} \quad (16)$$

χρησιμοποιώντας την μέθοδο Levenberg – Marquardt (L-M, Marquardt, 1963) και την τεχνική Singular Value Decomposition (SVD, Press et al., 1992).

### 3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ MONFALCONE ΣΤΗ Β. ΙΤΑΛΙΑ

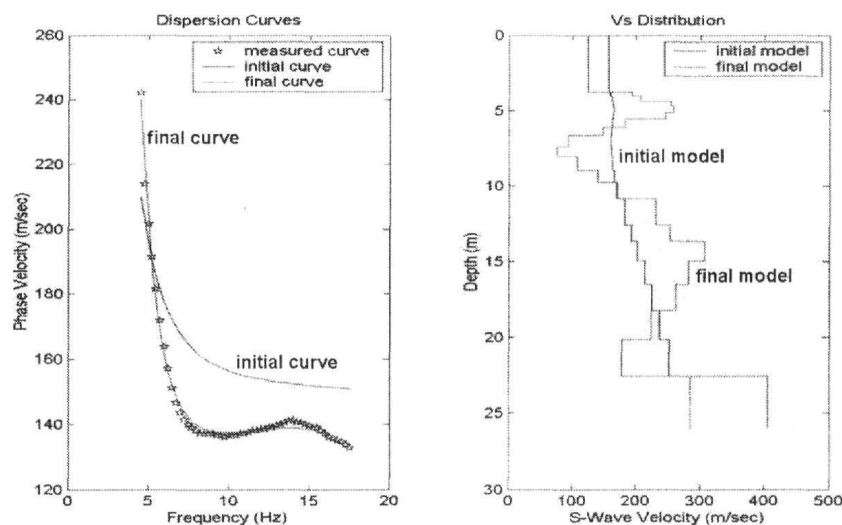
Η εφαρμογή της μεθοδολογίας της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων πραγματοποιήθηκε με επιτυχία στην περιοχή του Monfalcone στη βόρεια Ιταλία, όπου στόχος της διασκόπησης ήταν να χαρτογραφηθούν πιθανές θέσεις με θαμμένα απορρίμματα. Έτσι, για την απόκτηση των σεισμικών δεδομένων πραγματοποιήθηκαν 23 καταγραφές κοινής πηγής με ισαπόσταση πηγών 5 m, χρησιμοποιώντας την τεχνική roll along. Η ισαπόσταση των γεωφώνων ορίστηκε 2 m και η ελάχιστη απόσταση πηγής γεωφώνου 5 m. Για την καταγραφή χρησιμοποιήθηκε 24κάναλος σειсмоγράφος και γεώφωνα, τα οποία έχουν την δυνατότητα να καταγράφουν σεισμικές δονήσεις χωρίς να καρφώνονται στο έδαφος (gimbals).

Ο προσδιορισμός της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς από τις καταγραφές των επιφανειακών κυμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση πρότυπων αλγόριθμων που αναπτύχθηκαν στο Ερ-

γαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, χρησιμοποιώντας την τεχνική του μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου που περιγράφεται στην παράγραφο §2.1.2. Οι πειραματικές καμπύλες διασποράς για την καταγραφή με κωδικό πεδίου (FFID) 206 απεικονίζονται στο σχήμα 2α. Για την επίλυση του ευθέως προβλήματος χρησιμοποιήθηκε μια τροποποιημένη μέθοδος της Thomson – Haskell (Schwab and Kporoff, 1972) (§2.2.2), ενώ κατά τη διαδικασία της αντιστροφής ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο §2.3. Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για την καταγραφή με FFID 206 απεικονίζονται στο σχήμα 3. Δύο στρώματα χαμηλής ταχύτητας εντοπίζονται σε βάθη περίπου 7.5 m και 21 m και αποδίδονται σε αμμούχο πηλό και άργιλο αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό τονίζει την υπεροχή της μεθοδολογίας που περιγράφεται στην εργασία αυτή σε σχέση με την σεισμική διάθλαση, η οποία αδυνατεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε περιπτώσεις αναστροφής ταχυτήτων, όπως παρατηρήθηκαν στην συγκεκριμένη διασκόπηση.

Στο σχήμα 4 παρατίθεται το ερμηνευμένο σεισμικό μοντέλο και η γεωλογική στήλη από παραπλήσια ερευνητική γεώτρηση με κωδικό S1. Η γεώτρηση αυτή απέχει 18 m από το κέντρο του πρώτου αναπτύγματος πηγής γεωφώνων. Συνδυάζοντας τα δεδομένα της γεώτρησης (Πίνακας 1) και της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων, πραγματοποιήθηκε γεωλογική ερμηνεία της τομής της ταχύτητας διάδοσης των S – κυμάτων (σχήμα 4).

Παρατηρείται ότι το ασβεστολιθικό υπόβαθρο της περιοχής απαντάται σε βάθος που κυμαίνεται από 20 m (στα δυτικά) έως 24 m (στα ανατολικά), ενώ το λεπτό υπερκείμενο στρώμα της αμμούχου αργίλου φαίνεται να πληρώνει τα κοιλώματα του ασβεστολιθικού ανάγλυφου. Το επιφανειακό στρώμα, όπως έδειξε και η γεώτρηση, αποτελείται από ετερογενές έδαφος σε διάφορες αναλογίες με στερεά απορρίμματα. Η περιοχή με το ερωτηματικό αντιστοιχεί σε αμφιλεγόμενη ερμηνεία επειδή η πληροφορία για τις ταχύτητες στο σημείο αυτό προέκυψε από παρεμβολή δεδομένων γειτονικών περιοχών.

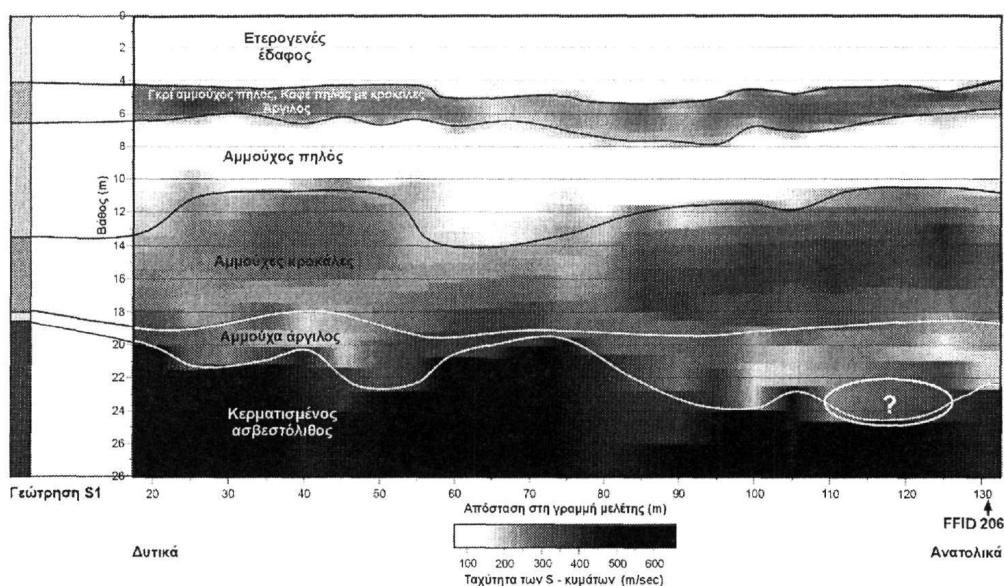


Σχήμα 3. Αποτελέσματα της αντιστροφής για την καταγραφή με κωδικό πεδίου (FFID) 206. Η θέση της καταγραφής αυτής πάνω στη γραμμή μελέτης υποδεικνύεται στο σχήμα 4.

Πίνακας 1. Γεωλογική ερμηνεία της γεώτρησης S1

Ανω επιφάνεια στρώματος (m)	Κάτω επιφάνεια στρώματος (m)	Γεωλογική περιγραφή
0.0	4.0	Ετερογενές έδαφος με απορρίμματα
4.0	4.6	Γκρι αμμούχος πηλός
4.6	5.0	Καφέ πηλός με ασβεστολιθικές κροκάλες
5.0	6.5	Ιλύς και άργιλος
6.5	13.0	Αμμούχος πηλός
13.5	18.0	Ασβεστολιθικές αμμούχες κροκάλες
18.0	18.3	Αμμούχα άργιλος
18.3	20.0	Κερματισμένος ασβεστόλιθος (υπόβαθρο)



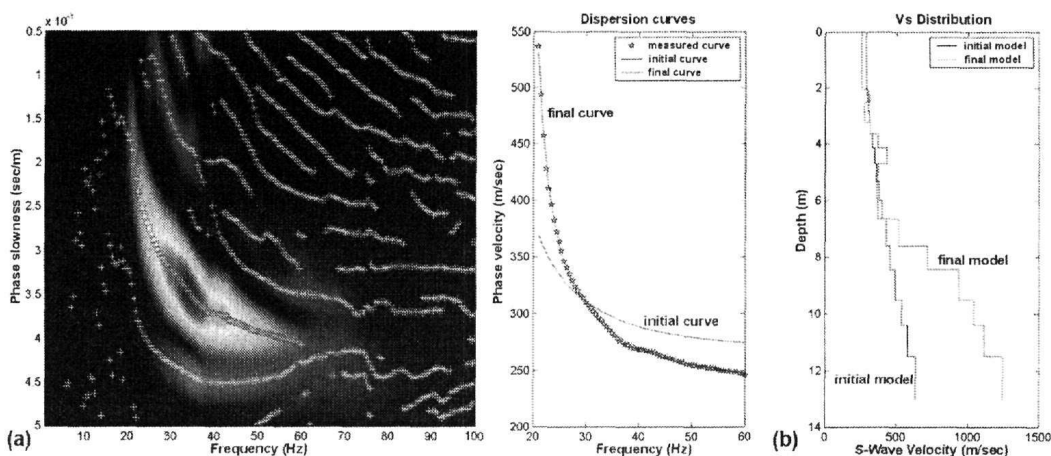


Σχήμα 4. Αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων στην περιοχή του Monfalcone στη βόρεια Ιταλία. Η γεωλογική ερμηνεία πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια γειτονικής γεώτρησης.

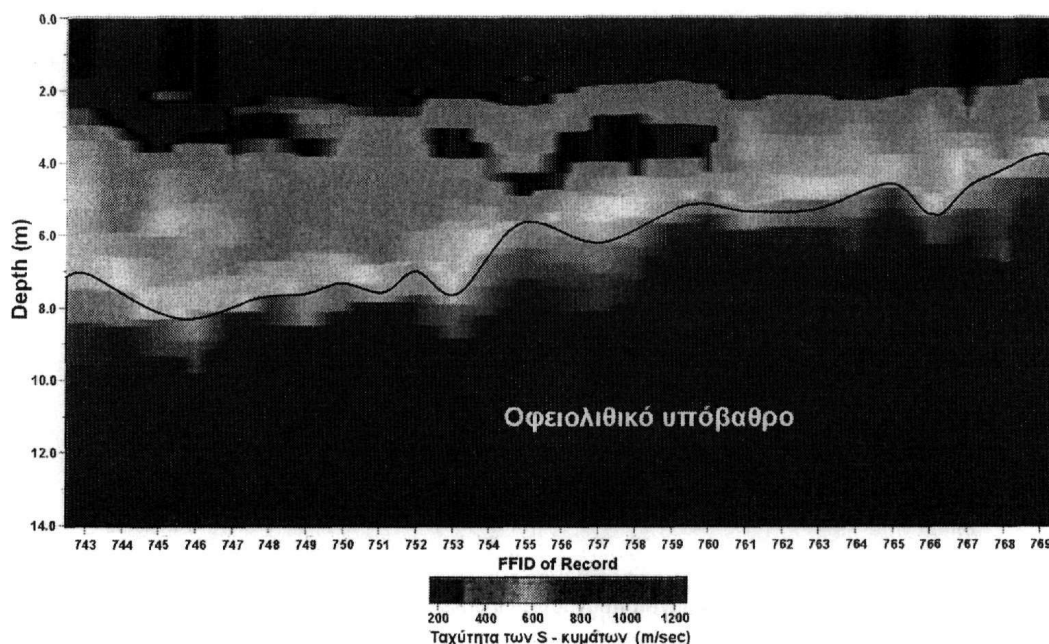
#### 4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ PORTO PETROLI, GENOA

Η ίδια μεθοδολογία απόκτησης και επεξεργασίας ακολουθήθηκε και στην περιοχή Porto Petroli, στη Γένοβα, όπου διασκοπήθηκαν 4 σεισμικές γραμμές μελέτης, ανάμεσα σε κτήρια της βιομηχανικής περιοχής. Η χαρτογράφηση του μεταμορφωμένου οφειολιθικού υποβάθρου της περιοχής αποτελεί μια σημαντική πληροφορία για τον καλύτερο σχεδιασμό άλλων γεωφυσικών μεθόδων και τον εντοπισμό πιθανών θέσεων όπου οι ρύποι είναι δυνατόν να εισχωρήσουν σε βαθύτερους σχηματισμούς.

Οι πειραματικές καμπύλες διασποράς για την καταγραφή με FFID 748 της γραμμής μελέτης Profile1 απεικονίζονται στο σχήμα 5a, ενώ τα αντίστοιχα αποτελέσματα της αντιστροφής παρατίθενται στο σχήμα 5b. Η ψευδοτομή των ταχυτήτων των S – κυμάτων για αυτήν την γραμμή απεικονίζεται στο σχήμα 6. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στους κωδικούς πεδίου των καταγραφών. Η γεωλογική ερμηνεία της τομής (προσδιορισμός του ανάγλυφου του υποβάθρου) πραγματοποιήθηκε με βάση γεωλογικές πληροφορίες για την περιοχή μελέτης.



Σχήμα 5. Πειραματικές καμπύλες διασποράς για την καταγραφή με FFID 748 της γραμμής μελέτης Profile1 (a) και τα αντίστοιχα αποτελέσματα της αντιστροφής (b).



Σχήμα 6. Ψευδοτομή των ταχυτήτων των S – κυμάτων για την γραμμή μελέτης Profile 1 στην βιομηχανική περιοχή του Porto Petrolì.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh των σεισμικών δεδομένων στις περιοχές μελέτης που παρουσιάζονται στην εργασία αυτή, η μεθοδολογία που περιγράφεται αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB υποστηριζόμενη από αλγόριθμους σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 77. Συνοπτικά, η μεθοδολογία αυτή για το μετασχηματισμό του κυματικού πεδίου στο χώρο  $p - \omega$  χρησιμοποιεί την τεχνική που έχει προταθεί από τους MacMechan and Yedlin (1981) και για τον υπολογισμό της συνάρτησης διασποράς την τροποποιημένη από τους Schwab and Knopoff (1972) τεχνική Thomson – Haskell. Κατά την αντιστροφή χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, η οποία υλοποιείται στην μεθοδολογία της ανάλυσης πινάκων SVD, ενώ η εξασφάλιση της σύγκλισης της αντιστροφής επιτυγχάνεται με την τεχνική Levenberg – Marquardt (L – M, Marquardt, 1963).

Η μεθοδολογία της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh αποδείχθηκε πολύ χρήσιμη στην οριοθέτηση του ετερογενούς εδάφους που περιέχει θαμμένα απορρίμματα στην περιοχή του Monfalcone και στη χαρτογράφηση του αναγλύφου του υποβάθρου της βιομηχανικής περιοχής του Porto Petrolì.

Συμπερασματικά, η μεθοδολογία αυτή αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων συνεισφέροντας στην χαρτογράφηση του υπεδάφους μέσω του προσδιορισμού της ταχύτητας των S – κυμάτων.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν την Ευρωπαϊκή Ένωση για την οικονομική υποστήριξη μέσω του προγράμματος EVKA-CT2001-00046-HYGEIA (HYbrid Geophysical technology for the Evaluation of Insidious contaminated Areas).



## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Κρητικιάκης Σ.Γ. 2001. Εκτίμηση της ταχύτητας των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων και των δυναμικών μηχανικών παραμέτρων από καταγραφές επιφανειακών κυμάτων Rayleigh. Μεταπτυχιακή εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 177σ.
- Ραπτάκης Δ. 1995. Συμβολή στον προσδιορισμό της γεωμετρίας και των δυναμικών ιδιοτήτων των εδαφικών σχηματισμών και στη σεισμική απόκριση τους. Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνική σχολή Α.Π.Θ.
- Haskell N.A. 1953. The dispersion of surface waves in multi-layered media. *Bulletin of Seismological Society of America*, 43, 17-34.
- Marquardt D.W. 1963. An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Indus. Appl. Math.*, 2, 431-441.
- McMechan G.A. & Yedlin M.J. 1981. Analysis of dispersive waves by wave field transformation. *Geophysics*, 46, 869-874.
- Miller R.D. & Xia J. 1999. Using MASW to Map Bedrock in Oathle, Kansas, Open file report No. 99-9. Harding Lawson Associates, Lee's Summit, Missouri.
- Miller R.D., Xia J., Park C.B. & Ivanov J.M. 1999. Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *The Leading Edge*, 18(12), 1392-1396.
- Misiek R. 1996. Surface waves: Application to lithostructural interpretation of near-surface layers in the meter and decameter range, Ph. D. Thesis (unpubl.), University of Ruhr, Bochum. p.109.
- Nazarian S. 1984. In situ determination of elastic moduli of soil deposits and pavement system by spectral-analysis-of-surface-waves method. Ph. D. Thesis (unpubl.), University of Texas.
- Park B.C., Miller D.R. & Xia J. 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800-808.
- Press W.H., Teukosky S.A., Vetterling W.T. & Flannery B.P. 1992. *Numerical Recipes in Fortran*, 2<sup>nd</sup> Edition, Cambridge University Press.
- Schwab F. & Knopoff L. 1972. Fast surface wave and free mode computations. in Bolt B.A. Edition, *Methods in computational physics*, Academic Press, 87-180.
- Stokoe II K.H., Wright G.W., Bay J.A. & Roesset J.M. 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method, in Woods R.D. Edition, *Geophysical characterization of sites*, Oxford Publishers.
- Xia J., Miller R.D. & Park C.B. 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, 64(3), 691-700.
- Yilmaz O. 1987. Seismic data processing, in Doherty M.S. Edition, *Investigations in Geophysics*, 2, Society of Exploration Geophysicists.

## ABSTRACT

### **RAYLEIGH SURFACE WAVE ANALYSIS AND APPLICATION AT THE MONFALCONE LANDFILL, AND AT THE INDUSTRIAL AREA OF PORTO PETROLI, GENOA, NORTHERN ITALY**

Kritikakis S. G.<sup>1</sup>, Vafidis A.<sup>1</sup>, Gourry J. C.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Applied Geophysics Lab, Department of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, 73100, Polytechnioupolis, Chania, gkritik@mred.tuc.gr, vafidis@mred.tuc.gr*

<sup>2</sup> *BRGM Development Planning and Natural Risks Division, Orléans, France, jc.gourry@brgm.fr*

During the last few years, the dispersion of Rayleigh surface waves has been intensively studied as an alternative to contemporary geotechnical and environmental geophysical techniques. Nowadays, Rayleigh surface wave analysis (SASW, MASW) is widely used for the determination of S-wave velocity distribution with depth.

This work aims to the description of the Rayleigh surface wave analysis methodology as well as to the presentation of its application on seismic data from geophysical surveys, carried out for the purposes of the HYGEIA European project, in two polluted areas: a) In the area of Monfalcone, northern Italy and b) in the industrial area of Porto Petroli, Genoa.

Rayleigh surface wave analysis proved very useful in locating the lateral and vertical extent of the heterogeneous soil in Monfalcone and in mapping the bedrock relief in Porto Petroli through S-wave velocity determination.